

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION
EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété
Intellectuelle
Bureau international



(43) Date de la publication internationale
23 octobre 2003 (23.10.2003)

PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 03/087721 A2

(51) Classification internationale des brevets⁷ :
G01C 19/56

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR03/01149

(22) Date de dépôt international : 11 avril 2003 (11.04.2003)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
02/04795 17 avril 2002 (17.04.2002) FR

(81) États désignés (*national*) : AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NO, NZ, OM, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(84) États désignés (*régional*) : brevet ARIPO (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), brevet eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), brevet européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), brevet OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

(71) Déposant (*pour tous les États désignés sauf US*) :
SAGEM S.A. [FR/FR]; Le Ponant de Paris, 27, rue
Leblanc, F-75015 Paris (FR).

Déclaration en vertu de la règle 4.17 :

— *relative à la qualité d'inventeur (règle 4.17.iv)) pour US
seulement*

(72) Inventeur; et

Publiée :

(75) Inventeur/Déposant (*pour US seulement*) : BEITIA, José
[FR/FR]; 25 ter, rue Victor Hugo, F-95390 Saint Prix (FR).

— *sans rapport de recherche internationale, sera republiée
dès réception de ce rapport*

(74) Mandataires : GORREE, Jean-Michel etc.; Cabinet
Plasseraud, 84, rue d'Amsterdam, F-75440 Paris Cedex 09
(FR).

*En ce qui concerne les codes à deux lettres et autres abrévia-
tions, se référer aux "Notes explicatives relatives aux codes et
abréviations" figurant au début de chaque numéro ordinaire de
la Gazette du PCT.*

(54) Title: METHOD FOR PRODUCTION OF A MECHANICAL RESONATOR WITH A PLANAR MONOLITHIC VIBRATING STRUCTURE MACHINED IN A CRYSTALLINE MATERIAL AND RESONATOR PRODUCED THUS

(54) Titre : PROCÉDE POUR CONSTITUER UN RÉSONATEUR MÉCANIQUE À STRUCTURE VIBRANTE MONOLITHIQUE PLANE USINÉE DANS UN MATÉRIAU CRISTALLIN, ET RÉSONATEUR AINSI CONSTITUÉ

(57) Abstract: The invention relates to the production of a mechanical resonator with a planar monolithic vibrating structure machined in a crystalline material. Where the material is trigonal (1), trigonal (2) or hexagonal in structure, said material is cut in the [001] plane or, where said material is cubic in structure, said material is cut in the [111] plane and the vibration mode of order 2 is used. Where the material is tetragonal (1) or tetragonal (2) or hexagonal said material is cut in the [001] plane or where said material is cubic in structure said material is cut in the [001], [100], or [010] plane and the vibration mode of order 3 is used. The resonator thus has a natural material frequency isotropy ($\Delta f_m = 0$).

(57) Abrégé : L'invention concerne la réalisation d'un résonateur mécanique à structure vibrante monolithique plane usinée dans un matériau cristallin; si le matériau cristallin est à structure trigonale (1), ou trigonale (2), ou hexagonale, il est coupé dans le plan [001] ou, s'il est à structure cubique, il est coupé dans le plan [111], et on exploite alors le mode vibratoire d'ordre 2; ou bien si le matériau cristallin est à structure tétragonale (1), ou tétragonale (2), ou hexagonale, il est coupé dans le plan [001] ou, s'il est à structure cubique, il est coupé dans le plan [001] ou [100] ou [010], et on exploite alors le mode vibratoire d'ordre 3; on confère ainsi au résonateur une isotropie naturelle de fréquence en matériau ($\Delta f_m = 0$).

WO 03/087721 A2

**PROCEDE POUR CONSTITUER UN RESONATEUR MECANIQUE A
STRUCTURE VIBRANTE MONOLITHIQUE PLANE USINEE DANS UN
MATERIAU CRISTALLIN, ET RESONATEUR AINSI CONSTITUE**

5 La présente invention concerne des perfectionnements apportés dans le domaine des dispositifs gyroscopiques à résonateurs mécaniques à structure vibrante monolithique plane usinée dans un matériau cristallin.

10 Les dispositifs gyroscopiques sont des dispositifs permettant de mesurer une vitesse de rotation ou un angle de rotation autour d'un ou plusieurs axes particuliers.

 Les réalisations techniques de dispositifs gyroscopiques sont aujourd'hui nombreuses, mais le besoin
15 se fait actuellement sentir pour des dispositifs de très faible encombrement (inférieur à quelques centimètres cube) réalisables en grande série à bas prix, résistant à des accélérations brutales et de niveau élevé, et capables de fournir des mesures avec une grande précision dans une
20 plage importante de vitesse de rotation. Parmi les domaines potentiels d'application pour ces dispositifs, on peut notamment citer celui de la navigation et du guidage des petits missiles spinnés (courte portée anti-char par exemple) ou munitions spinnées (obus ou mortiers), c'est-
25 à-dire des projectiles dont l'axe de roulis est soumis à une vitesse de rotation permanente élevée, typiquement de quelques tours par seconde pour les missiles spinnés ou les projectiles empennés et de plusieurs centaines de tours par seconde pour les projectiles gyroscopés.

30 Pour répondre à ce besoin, la technologie des gyroscopes vibrants associée à la réalisation de structures micro-usinées est particulièrement bien adaptée. Cependant, bien que plusieurs formules aient vu

le jour et se trouvent à un stade de développement et d'industrialisation plus ou moins avancé, aucune d'entre elles ne permet de répondre correctement à la problématique posée par les applications précédemment citées et pour lesquelles une mesure de rotation sur l'axe de roulis est nécessaire. Cette incapacité de ces formules à répondre correctement aux besoins provient de la conjonction de deux causes :

la première cause est qu'elles sont intrinsèquement adaptées à un bouclage de type gyromètre (mesure de vitesse angulaire) ;

la deuxième cause est que les dynamiques de vitesse de rotation sur l'axe de roulis sont trop élevées pour qu'un bouclage gyrométrique offre une précision suffisante et/ou ne finisse par mettre en saturation l'électronique de mise en œuvre du capteur.

De ce fait, il est connu que la seule réponse générale possible au problème posé consiste à utiliser des dispositifs intrinsèquement adaptés à un bouclage de type gyroscope (mesure de l'angle de rotation). En outre, comme cela est précisé dans le document FR 2 756 375, le bouclage gyroscope d'un résonateur mécanique vibrant disposé selon l'axe de roulis d'un porteur permet d'obtenir une grande précision de facteur d'échelle. En combinaison avec des résonateurs bouclés en mode gyromètre sur les axes transverses du porteur, il est ainsi possible de réaliser un système performant pour lequel les erreurs de biais des résonateurs transverses s'annulent sur un tour du porteur autour de son axe de roulis.

Dans le cas des dispositifs de technologie gyroscopes vibrants, la condition d'un bouclage optimal de type gyroscope passe par la recherche de structures dont l'anisotropie de fréquence entre les deux modes utiles

couplés sous l'effet des forces de Coriolis est intrinsèquement nulle. L'anisotropie de fréquence peut être décomposée en trois termes principaux :

$$\Delta f = \Delta f_m + \Delta f_g + \Delta f_s$$

5 où

Δf est l'anisotropie de fréquence globale,

Δf_m est, l'anisotropie de fréquence apportée par le matériau du résonateur,

10 Δf_g est l'anisotropie de fréquence apportée par la géométrie du résonateur, et

Δf_s est l'anisotropie de fréquence apportée par la suspension ou fixation du résonateur.

On pourrait ajouter d'autres termes comme par exemple les anisotropies apportées par la mise en œuvre électronique, mais ces termes sont supposés de deuxième
15 ordre devant les termes énoncés ici.

Ainsi, pour que l'anisotropie de fréquence globale Δf soit nulle, il est suffisant que les trois composantes Δf_m , Δf_g et Δf_s soient toutes nulles. D'autres conditions
20 suffisantes sont possibles, mais impliquent nécessairement des compensations entre les composantes Δf_m et/ou Δf_g et/ou Δf_s , ce qui finalement augmente la complexité de la définition de la structure du résonateur et rend
25 de tout paramètre. Il semble donc fondamental de rechercher des structures dont chaque terme Δf_m , Δf_g et Δf_s est nul. Toutefois, on constate que la voie de conception usuellement pratiquée consiste, pour les structures de résonateurs micro-usinés, à ne prendre en compte que les
30 aspects géométriques, alors qu'il est tout aussi fondamental de considérer le matériau constitutif du résonateur à travers ses symétries intrinsèques ou

résultant du plan de coupe dans lequel sera taillée la pastille (wafer) supportant la structure du résonateur.

A titre d'exemple permettant d'illustrer ce qui vient d'être exposé, on peut considérer l'exemple connu de
5 l'anneau vibrant dont la géométrie convient parfaitement à l'obtention d'un bouclage de type gyroscope. En réalisant cette structure dans une pastille de silicium (gravure humide) coupée selon le plan [001] et en utilisant les deux modes plans de déformation elliptique comme mode
10 principal et comme mode secondaire, on obtient naturellement $\Delta f_g = 0$, mais Δf_m est très largement supérieur à 1 Hz. En pratique, pour un anneau de fréquence moyenne 400 Hz, ayant un diamètre 5 mm et une épaisseur 100 μm , on obtient $\Delta f_m = 250$ Hz, si bien que finalement,
15 en négligeant l'anisotropie de fréquence apportée par la fixation ou d'autres éléments, on obtient une anisotropie de fréquence globale Δf de l'ordre de 250 Hz. Ce résultat est incompatible d'un bouclage performant de type gyroscope et illustre bien la problématique soulevée pour
20 les résonateurs issus des technologies de la microélectronique.

En effet, les structures de résonateur micro-usinées utilisent comme matériaux supports des matériaux cristallins, qui sont naturellement anisotropes et qui de
25 ce fait se prêtent particulièrement bien aux micro-usinages par gravure chimique, comme cela est pratiqué avec les procédés collectifs de la microélectronique. A l'avantage lié à l'aspect collectif des usinages, il convient cependant d'opposer l'inconvénient majeur
30 de l'anisotropie du matériau. Cette anisotropie, lorsqu'aucune règle de choix des symétries du matériau en cohérence avec la symétrie des modes utilisés n'est

respectée, conduit irrémédiablement à un terme Δf_m non nul.

L'invention a donc pour but de proposer une solution technologique (procédé et dispositif) qui assure, de manière certaine, l'obtention d'une isotropie de fréquence apportée par le matériau cristallin dans lequel est taillé le résonateur vibrant à structure plane, étant entendu que la présente invention vise seulement à donner les moyens d'obtention de l'isotropie en fréquence apportée par le matériau ($\Delta f_m = 0$) et que les problèmes de l'obtention des isotropies de fréquence dues à la géométrie (Δf_g) et à la suspension (Δf_s) sont à résoudre par ailleurs aux fins d'obtention d'une isotropie de fréquence globale ($\Delta f = 0$) apte à constituer un dispositif intrinsèquement gyroscopique (voir par exemple le document FR 01 02498).

Il faut comprendre que, si le matériau du résonateur est isotrope, alors les pulsations propres des deux modes d'ordre k deviennent égales, cela quel que soit k : $\omega_1 = \omega_2 = \omega$.

D'autre part, les déformées des deux modes propres d'ordre k sont identiques par rotation du repère d'un angle de $\frac{\pi}{2k}$. C'est ainsi que les modes d'ordre 2 de l'anneau vibrant correspondent à des déformées elliptiques décalées l'une par rapport à l'autre d'un angle de $\frac{\pi}{4} = 45^\circ$. De même, les modes d'ordre 3 de l'anneau vibrant correspondent à des déformées trilobées décalées l'une par rapport à l'autre d'un angle de $\frac{\pi}{6} = 30^\circ$.

Le plan de coupe du matériau cristallin est défini par la position de son vecteur normal \vec{V} , qui est lui-même défini par ses coordonnées (x, y, z) dans un repère normé

O_{ex}, e_y, e_z. Ainsi la seule donnée des trois informations [x, y, z] permet de définir de manière unique le vecteur normal \vec{V} , et donc le plan de coupe. Par exemple la donnée [001] donne les coordonnées du vecteur normal et le plan est parallèle au plan (e_x, e_y).

Par ailleurs, on sait que les matériaux cristallins actuellement connus se décomposent en 32 classes réparties en 9 familles du point de vue de la représentation des matrices de rigidité ou de souplesse : on citera notamment les familles tétragonale (1), tétragonale (2), trigonale (1), trigonale (2), hexagonale et cubique.

Enfin, on précise que seuls les modes vibratoires d'ordre $k = 2$ et $k = 3$ des résonateurs vibrants peuvent, actuellement, être exploités de façon pratique, tandis que l'exploitation de modes vibratoires d'ordre supérieurs ($k = 4, 5, \dots$) nécessiterait une mise en œuvre électronique très complexe (multiplication du nombre des électrodes d'excitation/détection qui serait incompatible avec une réalisation d'un dispositif gyroscopique de taille réduite, voire très réduite).

Certes, le document WO 01/55675 mentionne, pour le seul cristal de silicium, la possibilité d'un mode vibratoire d'ordre 2 avec un cristal de silicium coupé dans le plan [111] et d'ordre 3 avec un cristal de silicium coupé dans le plan [100]. Toutefois il s'agit là d'une information ponctuelle qui ne fournit à l'homme du métier aucune indication, pour les ordres vibratoires 2 et 3, quant aux autres plans de coupe possibles pour le silicium, ou quant aux plans de coupe possibles pour les autres matériaux cristallins à structure cubique, ou, encore plus généralement, quant aux plans de coupe possibles pour les autres matériaux cristallins.

Ceci étant précisé, l'invention, selon un premier de ses aspects, propose un procédé pour constituer un résonateur mécanique à structure vibrante monolithique plane usinée dans un matériau cristallin,

5 caractérisé en ce que :

- si le matériau cristallin est choisi parmi les matériaux cristallins à structure trigonale (1), ou trigonale (2), ou hexagonale, ce matériau est coupé dans le plan [001] ou, s'il est choisi parmi les
10 matériaux à structure cubique (silicium exclu), il est coupé dans le plan [111], et on exploite alors le mode vibratoire d'ordre 2,

ou bien

- si le matériau cristallin est choisi parmi les
15 matériaux cristallins à structure tétragonale (1), ou tétragonale (2), ou hexagonale, ce matériau est coupé dans le plan [001] ou, s'il est choisi parmi les matériaux à structure cubique, il est coupé dans le plan [001] ou [100] (silicium exclu) ou [010], et on
20 exploite alors le mode vibratoire d'ordre 3,

ce grâce à quoi on confère au résonateur une isotropie naturelle de fréquence en matériau ($\Delta f_m = 0$).

Ces caractéristiques peuvent être résumées comme il suit :

25

pour k = 2	famille trigonale (1)	→	plan [001]
	trigonale (2)	→	[001]
	hexagonale	→	[001]
	cubique (si exclu)	→	[111]

30

pour $k = 3$	famille tétragonale (1) →	plan [001]	
	tétragonale (2) →	[001]	
	hexagonale →	[001]	
	cubique →	$\begin{cases} [001] \\ [100] \\ [010] \end{cases}$	(si exclu)

5

Bien entendu la mise en œuvre des dispositions exposées peut accompagner une réalisation de structure axisymétrique qui conduit à une isotropie de géométrie $\Delta f_g = 0$.

10 Selon un second de ses aspects, l'invention propose un résonateur mécanique à structure vibrante monolithique plane usinée dans un matériau cristallin, caractérisé en ce que, pour que le résonateur soit isotrope en fréquence en matériau ($\Delta f_m = 0$), le matériau
15 cristallin est choisi parmi les suivants :

- a) matériau cristallin à structure tétragonale (1) ou tétragonale (2) coupé dans le plan [001], le résonateur présentant alors une isotropie de fréquence en matériau pour le mode vibratoire
20 d'ordre 3 ;
- b) matériau cristallin à structure trigonale (1) ou trigonale (2) coupé dans le plan [001], le résonateur présentant alors une isotropie de fréquence en matériau pour le mode vibratoire
25 d'ordre 2 ;
- c) matériau cristallin à structure hexagonale coupé dans le plan [001], le résonateur présentant alors une isotropie de fréquence en matériau pour les deux modes vibratoires d'ordre 2 et 3 ;
- 30 d) matériau cristallin à structure cubique

- coupé dans le plan [111] (silicium exclu), le résonateur présentant alors une isotropie de fréquence en matériau pour le mode vibratoire d'ordre 2
- 5 ou
- coupé dans les plans [001], [100] (silicium exclu) ou [010], le résonateur présentant alors une isotropie de fréquence en matériau pour le mode vibratoire d'ordre 3.
- 10 En conséquence de quoi, un résonateur constitué conformément à l'invention par un choix approprié du matériau cristallin constitutif, du plan de coupe dudit matériau cristallin et de l'ordre k du mode vibratoire présente une isotropie de fréquence en matériau ($\Delta f_m = 0$)
- 15 et, sous réserve de l'obtention par ailleurs d'une isotropie de fréquence globale $\Delta f = 0$ (par exemple avec $\Delta f_g = 0$ et $\Delta f_s = 0$, ou avec $\Delta f_g + \Delta f_s = 0$), un tel résonateur peut constituer le cœur d'un dispositif gyroscopique de conception optimale.

REVENDICATIONS

1. Procédé pour constituer un résonateur mécanique
à structure vibrante monolithique plane usinée dans un
5 matériau cristallin,
caractérisé en ce que :

- si le matériau cristallin est choisi parmi les
matériaux cristallins à structure trigonale (1), ou
trigonale (2), ou hexagonale, ce matériau est coupé
10 dans le plan [001] ou, s'il est choisi parmi les
matériaux à structure cubique (silicium exclu), il est
coupé dans le plan [111], et on exploite alors le mode
vibratoire d'ordre 2,
ou bien

15 - si le matériau cristallin est choisi parmi les
matériaux cristallins à structure tétragonale (1), ou
tétragonale (2), ou hexagonale, ce matériau est coupé
dans le plan [001] ou, s'il est choisi parmi les
matériaux à structure cubique, il est coupé dans le
20 plan [001] ou [100] (silicium exclu) ou [010], et on
exploite alors le mode vibratoire d'ordre 3,

ce grâce à quoi on confère au résonateur une isotropie
naturelle de fréquence en matériau ($\Delta f_m = 0$).

2. Résonateur mécanique à structure vibrante
25 monolithique plane usinée dans un matériau cristallin,
caractérisé en ce que, pour que le résonateur soit
isotrope en fréquence en matériau ($\Delta f_m = 0$), le matériau
cristallin est choisi parmi les suivants :

e) matériau cristallin à structure tétragonale (1) ou
30 tétragonale (2) coupé dans le plan [001], le
résonateur présentant alors une isotropie de
fréquence en matériau pour le mode vibratoire
d'ordre 3 ;

- 5 f) matériau cristallin à structure trigonale (1) ou
trigonale (2) coupé dans le plan [001], le
résonateur présentant alors une isotropie de
fréquence en matériau pour le mode vibratoire
d'ordre 2 ;
- g) matériau cristallin à structure hexagonale coupé
dans le plan [001], le résonateur présentant alors
une isotropie de fréquence en matériau pour les
deux modes vibratoires d'ordre 2 et 3 ;
- 10 h) matériau cristallin à structure cubique
- coupé dans le plan [111] (silicium exclu), le
résonateur présentant alors une isotropie de
fréquence en matériau pour le mode vibratoire
d'ordre 2
 - 15 ou
 - coupé dans les plans [001], [100] (silicium
exclu) ou [010], le résonateur présentant alors
une isotropie de fréquence en matériau pour le
mode vibratoire d'ordre 3.